

Une méthode de modélisation graphique par ordinateur pour l'étude des coraux et des récifs coralliens : étude préliminaire

par Jean-Marc DAUGET

Résumé. — Nous présentons les bases d'une méthode de modélisation par ordinateur que nous avons appliquée aux coraux. Elle permet, à partir de l'analyse architecturale des espèces et la réalisation de programmes informatiques, d'obtenir des images de synthèse en trois dimensions des structures coralliennes. Elle est utilisable au niveau du polype, à celui de la colonie, et peut être étendue à l'étude de parcelles récifales.

Mots-clés. — Corail, récif corallien, Scléactiniaires, modélisation, simulation par ordinateur, méthode.

A computerized graphic modelling method for the study of corals and coral reefs: a preliminary study

Abstract. — We present the basis of a computer modelling method that we applied to corals. Using both architectural analysis of species and elaboration of computer programs, it allows three dimensional synthesis images of corals structures. It can be used at the polyp level, at the colony level, and can be extended to the study of reef plots.

Key-words. — Coral, coral reef, Scleractinians, modelling, computer simulation, method.

J.-M. DAUGET, *Laboratoire de Botanique, Institut de Botanique, 163 rue Auguste Broussonnet, F-34000 Montpellier* — *Centre de biotechnologie de Nkolbisson, Section végétale, Université de Yaoundé 1, Cameroun* — *Adresse postale actuelle : Mission française de coopération, BP 1616, Yaoundé, Cameroun.*

INTRODUCTION

Dans des travaux précédents nous avons appliqué les méthodes de l'analyse architecturale, utilisées initialement en botanique tropicale (HALLÉ & OLDEMAN 1970; OLDEMAN 1974; HALLÉ *et al.* 1978) aux colonies coralliennes (DAUGET 1985; 1986; 1991a, b, c; 1994a, b). Ces travaux ont montré chez les coraux l'existence de modèles architecturaux (DAUGET 1991a) et d'un processus de croissance, la réitération du modèle (DAUGET 1985, 1991b). Notre démarche a été ici de structurer une méthode de modélisation par ordinateur permettant de traduire l'architecture des colonies en images de synthèse en trois dimensions. Nous présentons les bases de cette méthode, qui repose sur l'analyse architecturale des espèces, associée à la réalisation de programmes informatiques.

Les travaux portant sur la modélisation informatisée des coraux sont actuellement peu nombreux. Ceux de GRAUS & MACINTYRE (1976, 1982), BARNES & LOUGH (1990), montrent des simulations graphiques en deux dimensions de coupes dans des colonies massives. L'étude que nous abordons s'inspire de celles effectuées dans le domaine de la modélisation par ordinateur

des végétaux (DE REFFYE 1976, 1979, 1983; DE REFFYE *et al.* 1986, 1989; JAEGER 1987), qui utilisent les mêmes concepts architecturaux que ceux que nous appliquons aux coraux.

PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

ÉLÉMENTS SUR LA MORPHOLOGIE ET LA BIOLOGIE DES CORAUX

Le terme « corail » utilisé dans le langage courant ne correspond pas en zoologie à une division taxonomique précise. Nous décrivons ici, d'après CHEVALIER (1987), les Scléactiniaires, ou Madréporaires, qui regroupent la majorité des espèces actuelles.

La vie du corail commence par un stade de vie libre, la larve planula, mesurant quelques millimètres de longueur. La planula se fixe sur un support, puis se métamorphose peu à peu en polype. Celui-ci comporte une cavité gastro-vasculaire s'ouvrant à l'extérieur par la bouche et autour de laquelle sont disposés des tentacules dont le rôle est de capturer les éléments nutritifs. L'ectoderme du polype sécrète contre le substrat un squelette calcaire, ou polypiérite, comportant généralement un plateau basal, une muraille ou thèque, des septes prolongés à l'extérieur de la muraille par des côtes, et une columelle centrale. La production de calcaire par le polype provoque l'allongement progressif du polypiérite, qui forme alors une structure axiale tubulaire. La cavité limitée par la muraille à la partie supérieure du polypiérite est le calice. Certains coraux sont constitués d'un seul polype (*Fungia*), mais le plus souvent le polype initial se multiplie par bourgeonnements successifs pour former une colonie. Les polypes d'une même colonie sont reliés par des tissus vivants (coenosarque), permettant aux cavités gastro-vasculaires de communiquer entre elles. Le coenosarque joue un rôle important dans la construction coloniale en sécrétant du squelette entre les polypes, ce qui a pour effet de souder les polypiérites entre eux. La construction calcaire élaborée par le coenosarque entre les polypiérites est le coenosteum. L'ensemble de la production squelettique de la colonie (polypiérites et coenosteum) constitue le polypier.

CONCEPTS UTILISÉS DANS L'ÉTUDE ARCHITECTURALE DES CORAUX

L'étude architecturale repose sur un élément fondamental, l'axe. Dans le cas des coraux, le polypiérite correspond à la construction d'un seul polype, et nous considérons qu'il constitue l'axe élémentaire de la colonie. Le polypier peut être formé uniquement d'axes élémentaires ou bien être organisé en axes complexes formant l'architecture visible extérieurement de la colonie, et constitués eux-même de nombreux axes élémentaires (Fig. 1). L'étude architecturale peut porter uniquement sur les axes complexes, ou bien prendre en compte également les axes élémentaires.

Les principaux caractères architecturaux que nous utilisons sont l'orientation de croissance et le mode de ramification (axes ramifiés ou non ramifiés, ramification apicale ou latérale). Nous qualifions d'orthotrope un axe présentant une potentialité de croissance verticale, et de plagiotrope un axe se développant horizontalement ou sub-horizontalement. La ramification apicale s'effectue par division de l'apex tandis que la ramification latérale se caractérise par l'apparition de nouveaux axes sur les côtés de l'axe porteur. La notion de modèle architectural s'est développée à partir de l'étude des arbres tropicaux (HALLÉ & OLDEMAN 1970); elle traduit les principales règles de croissance de l'organisme étudié.

Chez les coraux, quatre modèles architecturaux ont été décrits (DAUGET 1991a) : le modèle de CORNER, correspondant à un seul axe non ramifié, le modèle de SCHOUTE, constitué entièrement d'axes à ramification apicale, le modèle d'ATTIMS, formé d'axes orthotropes à ramification latérale, et le modèle de WOOD JONES, élaboré par l'apposition d'axes mixtes comportant une partie basale plagiotope et une partie apicale orthotope. Dans certains cas, de nouvelles structures se développent sur les polypiers, réitérant le modèle. La réitération (OLDEMAN 1974) se manifeste chez les coraux sous ses deux formes : traumatique (DAUGET 1985), et adaptative (DAUGET 1991b). La réitération traumatique s'observe chez des colonies ayant subi un changement d'orientation (inclinaison, retournement), tandis que la réitération adaptative apparaît sans traumatisme extérieur, dans le cours du développement colonial.

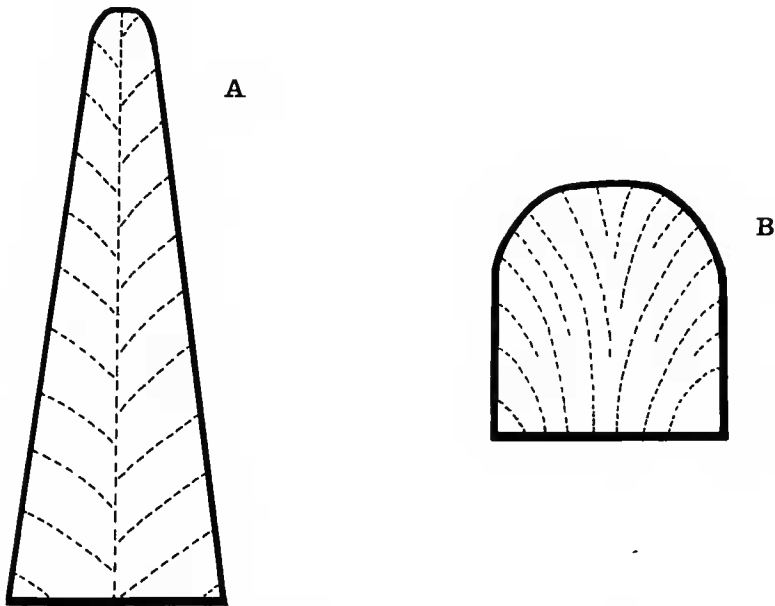


FIG. 1. — Schémas de deux types d'axes complexes ; A, avec polype apical (ex. *Acropora* sp.); B, sans polype apical (ex. *Porites* sp.). Les axes élémentaires, formés par les polypierites, sont figurés en pointillés.

MODÉLISATION ET SIMULATION

La modélisation informatisée comporte généralement une modélisation proprement dite, conceptuelle ou mathématique, et une simulation qui intègre dans des programmes informatiques les éléments qualitatifs et quantitatifs de la modélisation. L'analyse architecturale permet de déterminer les modèles architecturaux, les stratégies de croissance propres aux espèces étudiées, et représente la base concrète d'observation à partir de laquelle la simulation peut être effectuée. Au niveau du polype, la modélisation porte sur le polypierite et intègre les éléments de sa mor-

phologie : forme et ornements des septes, structure de la columelle, des cotés, de la muraille, du plateau basal. Au niveau de la colonie, elle s'applique au polypier. Dans ce cas, le polypiérite est considéré comme un axe, et la morphologie de ses constituants squelettiques n'est pas prise en compte dans l'analyse architecturale.

Pour ce qui est de la partie informatique, nous avons rédigé plusieurs programmes source en langage C, permettant de traduire en images de synthèse les structures étudiées. Les simulations ont été réalisées sur micro-ordinateur compatible PC. Le graphisme en trois dimensions a été traité en suivant les méthodes informatiques classiques (ROGERS & ADAMS 1990; ROGERS 1994). Celles-ci consistent en l'application d'une série de transformations, rotations et translations, aux coordonnées de la forme. Elles permettent de projeter l'image d'un objet en trois dimensions sur un écran en deux dimensions. Les principaux paramètres intervenant dans les projections sont la distance entre l'observateur et l'objet, celle entre l'observateur et l'écran de projection, ainsi que deux angles représentant respectivement l'élévation du point d'observation et la rotation de ce dernier autour d'un axe vertical. Les variations de ces angles permettent de voir l'objet sous n'importe quelle orientation, et celles de la distance observateur-écran en déterminent le grossissement. Nous avons adopté le mode de projection perspective, qui donne un rendu des formes proche de la vision réelle en introduisant une légère déformation de l'image proportionnelle à la distance entre l'observateur et l'objet.

Un des principaux aspects de la construction des formes en trois dimensions est l'élimination des parties cachées. Pour cela, nous avons utilisé la méthode qui consiste à colorer en priorité les polygones les plus éloignés de l'observateur (algorithme du peintre). Le même algorithme est utilisé pour déterminer l'ordre d'affichage des objets les uns par rapport aux autres.

Lorsque plusieurs éléments (substrat, polypiérites) sont regroupés dans un même paysage, nous introduisons pour chacun d'eux un rapport d'échelle qui permet d'ajuster leurs dimensions respectives. La répartition des éléments peut être fixe, ou bien présenter un caractère fluctuant que nous traduisons en utilisant des suites de nombres aléatoires.

APPLICATIONS

Nous avons effectué une simulation sur un polypiérite corallien fictif du type *Fungia*. Les images obtenues traduisent une forme générale de polypiérite constitué de septes rayonnants (Fig. 2). Chaque septa est formé d'un seul polygone coloré limité par un nombre variable de points. Neuf points ont été utilisés pour traduire les contours généraux d'un septa, ce nombre pouvant être augmenté pour obtenir des images plus détaillées (Fig. 3). La représentation du polypiérite dispose d'une grande souplesse, le nombre, la forme et les dimensions des septes étant variables à volonté.

La répartition des polypiérites sur une surface représentant un fond récifal a permis de réaliser un premier récif corallien très simple en images de synthèse (Fig. 4). La disposition de polypiérites sur une surface quelconque permet de simuler des fragments de colonies (ex. Fig. 5)

À titre d'essai sur les structures axiales traduisant l'architecture des colonies, nous avons abordé la plagiotropie par apposition d'*Acropora hyacinthus*. Ce mode de croissance s'exprime par l'apposition d'axes mixtes constitués d'une partie basale plagiotope et d'une partie apicale orthotope. Le passage de la plagiotropie à l'orthotropie se traduit par une courbure de l'axe

dans la partie convexe de laquelle se manifeste la ramification. Chez *A. hyacinthus*, la partie orthotrope des axes mixtes présente une croissance ralentie, ce qui limite la hauteur de la colonie et conduit à la formation de tables qui s'étendent dans le plan horizontal. Afin de traduire cette structure, nous avons divisé les axes mixtes en segments cylindriques. Pour chaque axe, des

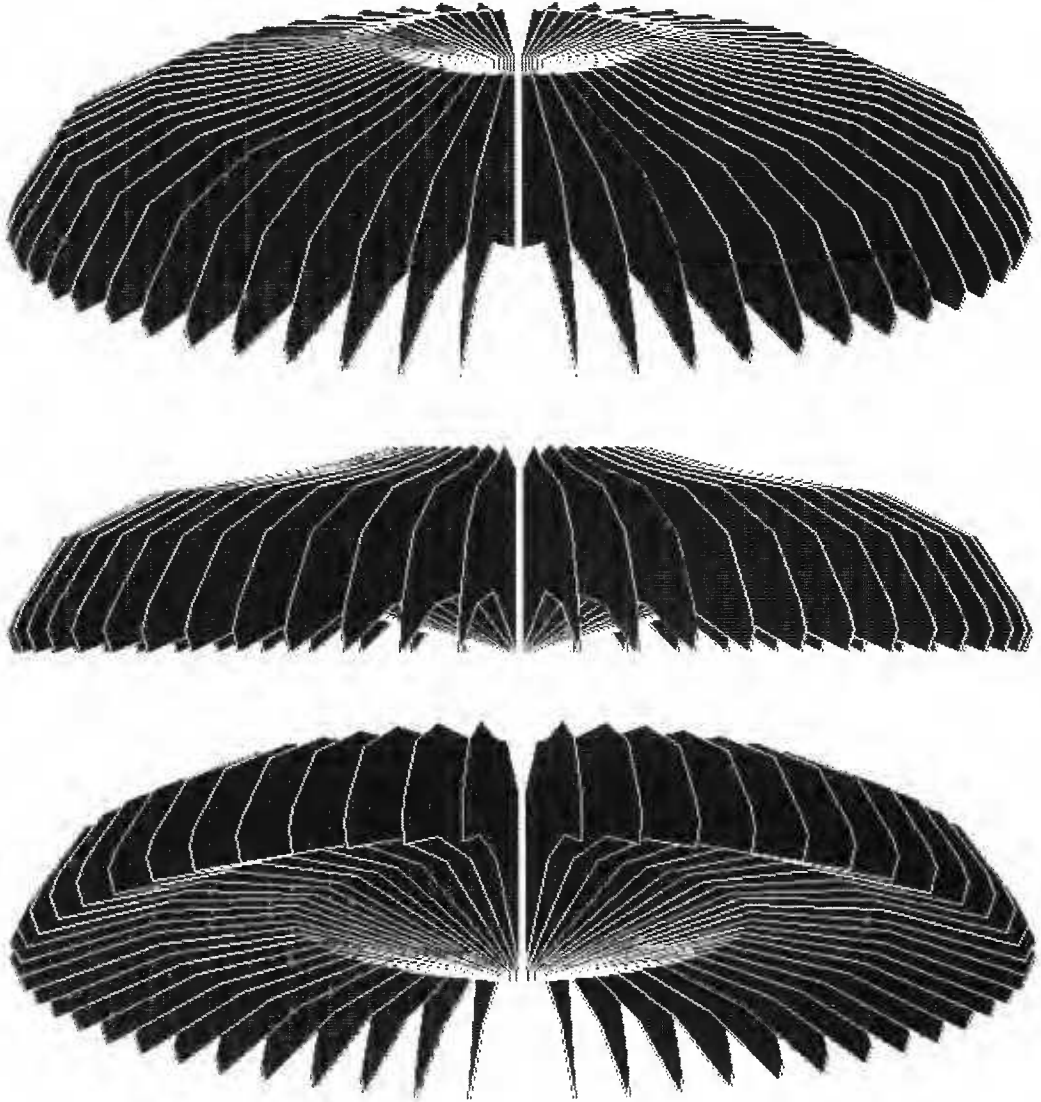


FIG. 2. — Polypière corallien, sous trois angles de vue différents.

segments ont été disposés horizontalement pour former la partie plagiotrope. Puis un angle de courbure a été introduit par rapport à l'horizontale, cet angle étant incrémenté à chaque nouveau segment produit au cours de la croissance jusqu'à ce que la partie orthotrope soit strictement verticale. La longueur plus faible des segments dressés traduit la croissance ralentie des parties orthotropes (Fig. 6).

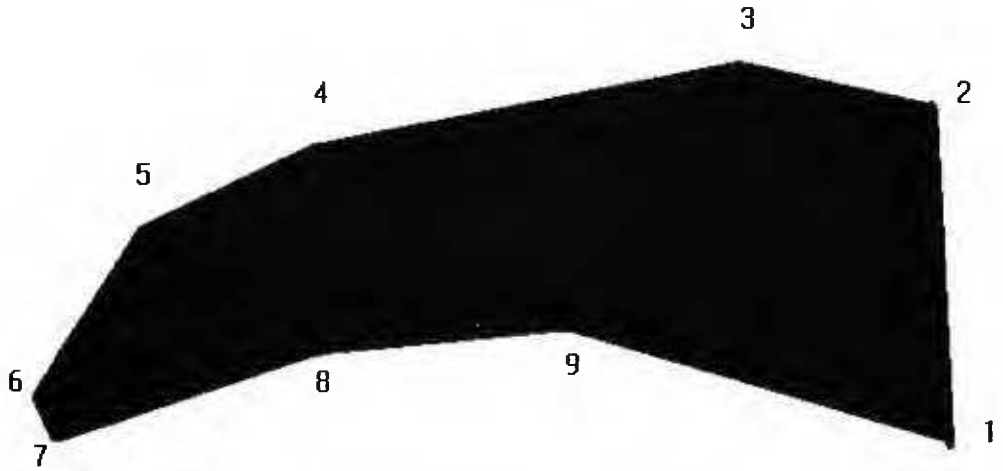


FIG. 3. — Septe en vue latérale. Les contours sont délimités ici par neuf sommets.

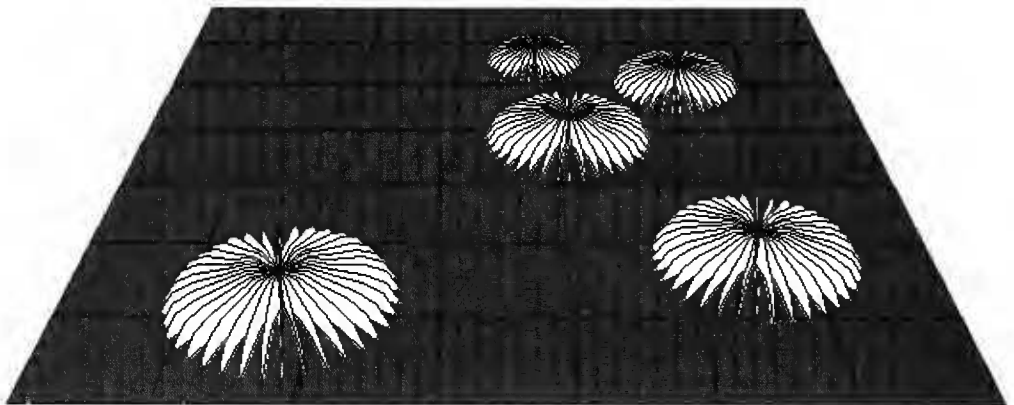


FIG. 4. — Répartition de polypierites du type *Fungia* sur un fond récifal.

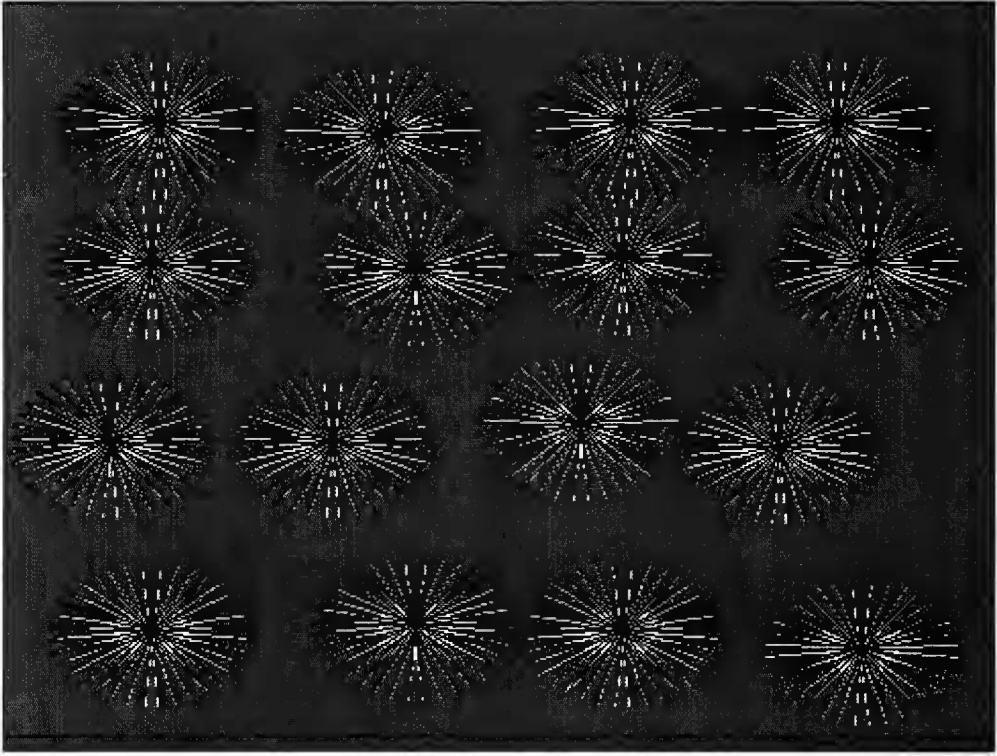


FIG. 5. — Fragment de colonie comportant plusieurs polypières.

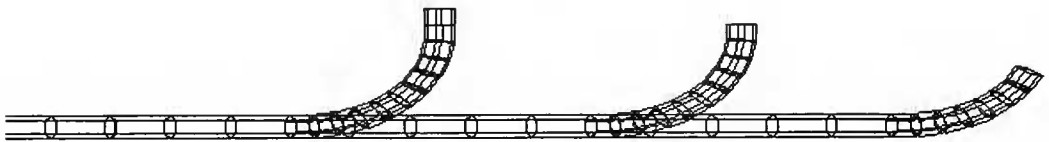


FIG. 6. — Plagiotropie par apposition rencontrée chez les coraux « en table » du type *Acropora hyacinthus*.

DISCUSSION

Notre but était de structurer une méthode de modélisation graphique par ordinateur applicable aux coraux. Les premiers essais réalisés dans le cadre de cette étude montrent que la méthode ici présentée permet d'obtenir des images de synthèse en trois dimensions de polypières et de polypiers. Elle ouvre également la possibilité de modéliser des portions de récif corallien.

Les images obtenues traduisent la résultante des éléments structuraux, qualitatifs et quantitatifs, réunis dans l'étude biologique et permettent de visualiser en une seule fois l'expression d'un grand nombre de données. L'intégration, dans les programmes, des paramètres liés au temps peut être effectuée aisément, permettant la simulation de la croissance des organismes pendant une période donnée.

Dans un contexte plus général, on peut remarquer que les organismes fixés présentent le plus souvent des caractéristiques morphologiques communes (HALLÉ 1979; JACKSON 1979; JACKSON & HUGHES 1985; DAUGET 1992, 1994a). Leur construction s'effectue par ajouts progressifs de matière au cours du temps. Il y a production de nouvelles structures, de nouveaux axes répartis dans l'espace en fonction de modes de croissance. La méthode de simulation par ordinateur fondée sur l'analyse architecturale que nous appliquons aux coraux pourrait par conséquent s'adapter également à l'étude de ces autres groupes : gorgones, hydraires, antipathaires, bryozoaires et éponges notamment.

Remerciements

Nos remerciements vont à Francis HALLÉ, Claude EDELIN et à tous les membres du Laboratoire de Botanique du Pr HALLÉ (Institut de Botanique, université de Montpellier) pour les nombreuses discussions sur la forme qui ont été à l'origine de ce travail. Nous remercions également Philippe DE REFFYE (Laboratoire de Modélisation du CIRAD) de nous avoir offert de nombreux documents produits par son laboratoire, ainsi que Marc JAEGER et Evelyne COSTES pour leurs thèses. Nous exprimons notre gratitude à Régis ETOURMY, Albin MULIER et Jérôme DELATOUR pour leurs conseils en informatique et leur amical soutien dans ce domaine.

RÉFÉRENCES

- BARNES D. J. & LOUGH J. M., 1990. — Computer simulations showing the likely effects of calix architecture and other factors on retrieval of density information from coral skeletons. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **137**: 141-164.
- CHEVALIER J. P., 1987. — Ordre des Scléactiniaires. In P. P. GRASSÉ (ed.). *Traité de zoologie, Cnidaires*. Paris, Masson, **3** (3) : 404-764.
- DAUGET J.-M., 1985. — La réaction aux traumatismes : comparaison entre les arbres et les coraux. *Rev. Ecol. (Terre et Vie)* **40** : 113-118.
- 1986. — Application des méthodes architecturales aux coraux. *Quelques traits communs aux formes vivantes fixées*. Thèse de doctorat, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier : 245 p.
- 1991a. — Application of tree architectural models to reef-coral growth forms. *Mar. Biol.* **106** : 157-165.
- 1991b. — La réitération adaptative, un nouvel aspect de la croissance de certains Scléactiniaires récifaux. Exemple chez *Porites* sp., cf. *cylindrica* Dana. *C. r. Acad. Sci. Paris, sér. III*, **313** : 45-49.
- 1991c. — Approche architecturale des écomorphoses chez *Seriatopora hystrix* (Cnidaria : Scleractinia). *Bull. Mus. natl. Hist. Nat.*, Paris, 4^e sér., section A **13** (3-4) : 283-288.
- 1992. — Effets d'un changement d'orientation de la colonie sur la morphologie de *Isis hippuris* Linné, 1758 (Gorgonacea) : note préliminaire. *Bull. Soc. zool. Fr.* **117** : 375-382.
- 1994a. — Essai de comparaison entre l'architecture des coraux et celle des végétaux. *Bull. Mus. natl. Hist. Nat.*, Paris, 4^e sér., section A **16** (1) : 39-53.
- 1994b. — Essai d'application à un récif corallien de la méthode du profil architectural utilisée dans l'étude des forêts tropicales. *Bull. Mus. natl. Hist. nat.*, 4^e sér., section A **16** (2-4) : 219-230.

- GRAUS R. R. & MACINTYRE L. G., 1976. — Light control of growth form in colonial reef corals: computer simulation. *Science* **193** : 895-897.
- 1982. — Variation in growth forms of the reef coral *Montastrea annularis* (Ellis & Solander): a quantitative evaluation of growth response to light distribution using computer simulation. *Smithson. Contr. mar. Sci.* **12** : 441-464.
- HALLÉ F., 1979. — Les modèles architecturaux chez les arbres tropicaux ; une approche graphique. In P. DELATTRE & M. THELLIER (eds.). *Élaboration et justification des modèles. Applications en biologie*. Paris, Maloine : 537-550.
- HALLÉ F. & OLDEMAN R. A. A., 1970. — *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Paris, Masson, 178 p.
- HALLÉ F., OLDEMAN R. A. A. & TOMLINSON P. B., 1978. — *Tropical trees and forests. An architectural analysis*. Berlin, Springer-Verlag, 441 p.
- JACKSON J. B. C., 1979. — Morphological strategies of sessile animals. In G. LARWOOD & B. R. ROSEN (eds.). *Biology and Systematics of Colonial Organisms*. London, Academic Press: 499-555.
- JACKSON J. B. C. & HUGHES T. P., 1985. — Adaptative strategies of coral-reef invertebrates. *American Scientist* **73**: 265-274.
- JAEGER M., 1987. — *Représentation et simulation de croissance des végétaux*. Thèse de doctorat, univ. Louis Pasteur, Strasbourg : 156 p.
- OLDEMAN R. A. A., 1974. — L'architecture de la forêt guyanaise. *Mém. ORSTOM*, **73**, Paris, 204 p.
- REFFYE Ph. DE, 1976. — Modélisation et simulation de la verse du caféier à l'aide de la théorie de la résistance des matériaux. *Café Cacao Thé* **20** (4) : 251-272.
- 1979. — *Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au Coffea robusta*. Thèse de doctorat d'État, université d'Orsay, 194 p.
- 1983. — Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier robusta. 4. Programmation sur micro-ordinateur du tracé en trois dimensions de l'architecture d'un arbre. Application au caféier. *Café Cacao Thé* **27** (1) : 3-19.
- REFFYE Ph. DE, EDELIN C., JAEGER M. & CABART C., 1986. — Simulation de l'architecture des arbres. *Naturalia monspeliensia*, Colloque international sur l'Arbre, Montpellier, 9-14 sept. 1985 : 223-240.
- REFFYE Ph. DE, EDELIN C., JAEGER M., 1989. — La modélisation de la croissance des plantes. *La Recherche* **207** : 158-189.
- ROGERS D. F., 1994. — *Algorithmes pour l'infographie*. Ediscience International, Paris, 518 p.
- ROGERS D. F. & ADAMS J. A., 1990. — *Mathematical elements for computer graphics*. McGraw-Hill, Paris, 611 p.